

УДК 621.365.32

Ярымбаш Дмитро Сергійович, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри «Електропостачання промислових підприємств». Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38-066-965-86-73, E-mail: yarymbash@gmail.com

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ПЕЧАХ АЧЕСОНА

Представлено теоретичні дослідження та моделювання електромагнітних і термоелектричних процесів на основі чисельної реалізації методом скінчених елементів узагальненої 3D моделі графітації постійним і змінним струмом, що відображає особливості електромагнітних, електротеплових і тепломасообмінних процесів в печі Ачесона, її керні і бічних шинних пакетах пічної петлі.

Ключові слова: 3D моделювання, процес графітації, електромагнітні та температурні поля, метод скінчених елементів, витрати електроенергії, якість електродної продукції.

УДК 621.365.32

Ярымбаш Дмитрий Сергеевич, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий». Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, Украина, 69063, тел. +38-066-965-86-73, E-mail: yarymbash@gmail.com

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕЧАХ АЧЕСОНА

Представлены теоретические исследования и моделирование электромагнитных и термоэлектрических процессов на основе численной реализации методом конечных элементов обобщенной 3D модели графитации постоянным и переменным током, отображающей особенности электромагнитных, электротепловых и тепломассообменных процессов в печи Ачесона, ее керне и боковых шинных пакетах печной петли.

Ключевые слова: 3D моделирование, процесс графитации, электромагнитные и температурные поля, метод конечных элементов, расход электроэнергии, качество электродной продукции.

УДК 621.365.32

Yarymbash Dmytro Sergiyovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer of Department «Electricity supply of industrial enterprises». Zaporizhzhya national technical university, Zaporizhzhya, Ukraine, Zhukovsky Str., 64, Zaporizhzhya, Ukraine, 69063, tel. +38-066-965-86-73, E-mail: yarymbash@gmail.com

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC AND THERMOELECTRIC PROCESSES IN THE ACHESON FURNACE

The theoretical research and modeling of electromagnetic and thermoelectric processes by numerical finite element method realization of the generalized three-dimensional models of DC and AC graphitization are proposed. The features of electromagnetic, electrothermal and heat-mass transfer processes in the Acheson furnace, core and side busbar packages of furnace loops are taken into account. It was established that the increase of AC graphitization specific capacity in the end areas of blanks are achieved by surface effect in the core and of external surface effect of the side bus packages. It will allow to align the temperature distribution in the electrode blanks, to decrease the temperature differences and to provide the higher level of electrode quality as compared with DC graphitization. The character and laws of the distribution of current density and specific electrical losses in the core and electrode blanks during DC and AC graphitization, and their quantitative differences in the main and end areas of the core are determined. The three-step mode of the of graphitization power input by the core temperature criteria is substantiated.

Keywords: 3D modeling, graphitization, electromagnetic and temperature fields, finite element method, electricity consumption, electrode quality.

Постановка проблеми

До настоящего времени в отечественной электродной промышленности для производства продукции качества Ultra High Power (UHP) используются печи графитации (ПГ) Ачесона. ПГ Ачесона относятся к группе электрических печей сопротивления прямого нагрева. Они состоят из корытообразного основания; двух торцевых стенок с проемами для укладки токоподводящих электродов, к которым через короткую сеть (КС) подводится ток от мощного источника питания (трансформатора или выпрямителя); подовой набивки, состоящей из смеси песка и порошкообразных углеродистых материалов; боковых стенок; рабочего пространства (керны), образованного уложенными в горизонтальные ряды графитируемыми заготовками электродов с токопроводящей пересыпкой и специальными слоями шунтирующей засыпки и теплоизоляционной шихты по периметру его поперечного

сечения; графитовых плит, расположенных между торцевыми стенками и керном ПГ и обеспечивающих его электрический контакт с токоподводящими графитовыми электродами. Для отвода газов, которые образуются в процессе графитации, на печь устанавливается стальной кожух, который подключается к вытяжной магистрали. Вдоль ПГ расположены проводники боковых шинных пакетов (БШП).

Для ПГ, работающих по технологии Ачесона, характерны высокие расходы электрической энергии и перепады температур в объеме керна печи и в заготовках электродов. Последний фактор обуславливает трещинообразование и снижение качества конечной продукции, для обеспечения которого требуются ограничения на темп ввода мощности графитации и разогрева керна. Это приводит к росту продолжительности технологического процесса и затрат электроэнергии для компенсации тепловых потерь в окружающую среду.

Большая энергоемкость процесса графитации, составляющая 7...8 МВт·часов на тонну электродной продукции [1,2], значительные мощности установленного оборудования обуславливают проблему рационального распределения удельной тепловой мощности в объеме керна для ее концентрации возле менее прогретых торцов электродов. Это может обеспечить выравнивание температурного поля заготовок, увеличение темпа ввода мощности графитации, снижение энергозатрат на кампанию графитации и повышение качества готовой продукции.

Анализ исследований и публикаций

Характер распределения активной мощности в объеме керна печи графитации, особенности его нагрева и формирования температурного поля, оказывающие существенное влияние на энергоэффективность технологического процесса, изучены все еще недостаточно.

При исследовании электротепловых процессов, протекающих в объеме керна ПГ в процессе графитации заготовок электродов, используются экспериментальные, аналитические, численные методы моделирования и их комбинации.

Экспериментальные исследования на действующем технологическом оборудовании ограничены возможностями контрольно-измерительных приборов, температурными режимами графитации, агрессивными средами, а также значительными финансовыми затратами при варьировании технологических режимов и конструктивных параметров оборудования [1, 2].

Аналитические методы применяются, как правило, при исследовании линейных или линеаризованных моделей простой геометрической формы [3, 4].

При численном моделировании могут учитываться особенности конструкции печей графитации и шинных пакетов печной петли (ПП), пространственное размещение заготовок электродов в пересыпке керна, температурные зависимости электромагнитных и теплофизических свойств материалов керна ПГ и шинных пакетов, а также технологические режимы графитации. При этом математические модели и методы их численной реализации должны удовлетворять требованиям точности и вычислительной эффективности.

При исследовании термоэлектрических режимов работы печей графитации широко применяются схемные модели, для определения параметров которых используются эмпирические соотношения и методы теории электрических цепей [5]. В основе данного подхода лежит целый ряд допущений и упрощений, которые существенно искажают реальную картину электротепловых и электромагнитных процессов переменного тока в сложных пространственных многокомпонентных гетерогенных системах керна и шинных пакетов, не учитывая влияние поверхностного эффекта от поля собственных токов и внешние поверхностные эффекты. Это приводит к значительному увеличению погрешности при расчетах мощности графитации, токовых нагрузок, объемного распределения плотности тока, удельной электрической мощности в графитируемых заготовках электродов и температурного поля керна, не позволяя достоверно оценить преимущества и недостатки процессов графитации постоянным и переменным током.

В известных 3D моделях термоэлектрических процессов графитации постоянным

током используются сопряженные системы дифференциальных уравнений стационарной электропроводности и нестационарной теплопроводности для расчетного объемного элемента, который отображает kern ПГ. Этот элемент отсекается от керна вертикальными плоскостями, одна из которых проходит через оси заготовок вертикального ряда, а другая – посередине ближайшей междурядной пересыпки [6].

С целью упрощения численной реализации математической модели печи графитации авторы [6] рассматривают узкий расчетный элемент ПГ, который не отображает в достаточной мере особенности конструктивного исполнения в продольных сечениях ПГ, поскольку его длина не превышает 3...4% от длины керна. Кроме того в работе [6] сделано допущение о постоянстве электрических потенциалов на граничных вертикальных плоскостях объемного элемента керна, что не соответствует реальной картине электрического поля [7].

Термоэлектрическая модель [6] не позволяет исследовать электромагнитные и электротепловые процессы графитации заготовок электродов переменным током. Она не учитывает особенности электромагнитных и температурных полей в торцевых и внутренних зонах керна, влияние токов в шинных пакетах ПП, экранирующие эффекты от стального кожуха и не обеспечивает требуемую точность и достоверность расчетов объемного распределения плотности переменного тока и удельной электрической мощности в кerne и графитируемых заготовках электродов.

При численном моделировании процессов графитации широкие возможности раскрывают методы конечных элементов (МКЭ), позволяющие реализовывать сопряженные модели, описывающие электромагнитные процессы с учетом температурных зависимостей электрических, магнитных и теплофизических свойств материалов в сложных пространственных многокомпонентных системах [8].

Необходимость разработки технических решений, соответствующих современным требованиям энергоэффективности технологического процесса графитации и УНР уровню качества продукции, обуславливает актуальность создания достоверных корректно сформулированных сопряженных электромагнитных, электротепловых и теплообменных 3D моделей и расширение области приложения МКЭ для полевых расчетов процессов графитации постоянным и переменным током.

Цель работы. Исследование режимов, 3D моделирование и расчеты методом конечных элементов сопряженных электромагнитных, электротепловых и теплообменных процессов графитации, распределения плотностей токов и удельных мощностей нагрева при графитации переменным и постоянным током, которые учитывают особенности конструкции печей графитации, керна и шинных пакетов, температурные зависимости электрофизических, теплофизических и массообменных свойств.

Материал и результаты исследований

При формировании обобщенной 3D модели графитации выделяется расчетная область с БШП 7 и ПГ с шамотной футеровкой 5, стальным кожухом 6 и керна, которой включает заготовки электродов 1, пересыпку керна 2, электропроводящую засыпку 3 и теплоизоляционную шихту 4 (рис. 1,а). Эта расчетная область обладает свойствами симметрии относительно вертикальной плоскости симметрии, которая проходит через продольную ось керна ПГ.

По данным [8] электромагнитное поле в окрестностях графитовых плит и торцов керна ПГ приближается к плоскопараллельному полю, а падения напряжения в графитовых плитах существенно меньше падений напряжения на других участках ПП [9]. Поэтому моделирование электромагнитных процессов в области керна ПГ и БШП можно осуществлять инвариантно к областям торцевых шинных пакетов и токоподводов.

В соответствии с [1, 2] принимаются допущения об изотропности свойств материалов, неизменности магнитных свойств неферромагнитных материалов, отсутствии токов смещения и свободных зарядов. Принимая во внимание подобие электрических полей в электроизоляционных средах и в электропроводящих средах с достаточно малой удельной

электрической проводимостью, можно заменить электроизоляционные среды, окружающие области керна, БШП и кожуха ПГ, электропроводящими средами с достаточно малой удельной электропроводностью.

Допущение о симметричном распределении токовых и тепловых нагрузок в токоподводах, крене, других элементах ПГ, ПП и геометрическая симметрия ПГ, ПП (рис. 1,а) обуславливают симметрию электромагнитных и температурных полей относительно вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось ПГ. Поэтому, для моделирования и расчетов можно рассматривать только одну из двух симметричных подобластей (рис. 1,б).

Электромагнитное поле в электропроводящих средах описывается сопряженной системой уравнений Максвелла относительно векторного магнитного и скалярного электрического потенциалов [8]

$$\begin{cases} \nabla \times \left[(\mu_0 \mu_{\Sigma j})^{-1} \nabla \times A_j \right] = Q_A, \\ \nabla \cdot [\sigma_j(\theta_j) \cdot \nabla \cdot V_j] = Q_V, \end{cases} \quad (1)$$

где A, V – векторный магнитный и электрический потенциалы;

$\sigma_j(\theta)$ – температурная зависимость удельной электрической проводимости; θ_j – локальная температура;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; μ_{Σ} – эквивалентная относительная магнитная проницаемость.

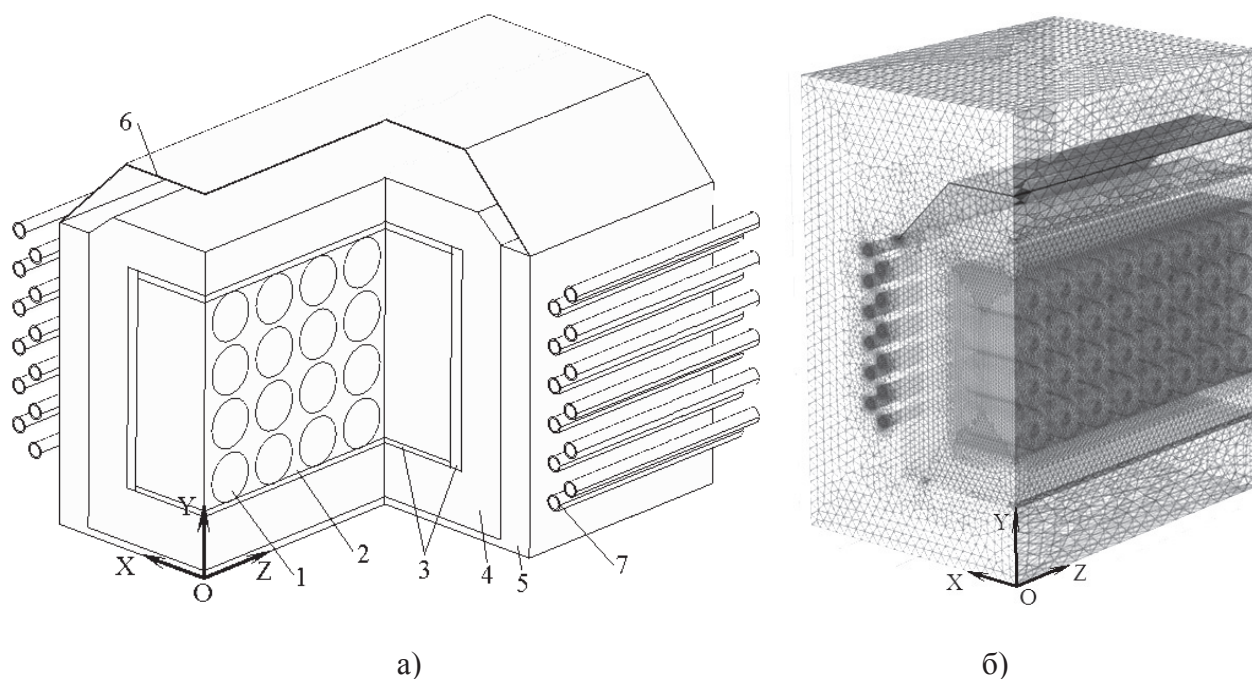


Рис. 1. Конструкция ПГ и БШП (а) и расчетная область 3D модели графитации (б)

Для ПГ постоянного тока уравнения системы (1) будут однородными, так как

$$\begin{cases} Q_A = 0, \\ Q_V = 0, \end{cases} \quad (2)$$

а для ПГ переменного тока должны рассматриваться выражения для правых частей в дифференциальных уравнениях системы (1)

$$\begin{cases} Q_A = -j\omega \sigma_j(\theta_j) (A_j + \nabla V_j), \\ Q_V = -j\omega \cdot \nabla \cdot (\sigma_j(\theta_j) \cdot A_j), \end{cases} \quad (3)$$

где ω – угловая частота; индексы $j = 1...7$ определяют электропроводящие подобласти в расчетной области (рис. 1,а).

Температурные зависимости для удельных электрических проводимостей активных и конструкционных материалов ($\sigma_j(\theta)$, $j=1,2,3,6,7$) принимаются по данным [1, 2], а эквивалентная относительная магнитная проницаемость μ_3 для стального кожуха 6 ПГ (рис. 1,а) определяется как функция модулей амплитудных значений индукции в этом кожухе [10].

Система уравнений (1) дополняется условиями калибровки Кулона [8]

$$\text{div}(\mathbf{A}) = 0. \quad (4)$$

Электротепловая модель отображается сопряженной системой уравнений нестационарной теплопроводности

$$\begin{cases} c_{\text{экв}j}(\theta_j) \cdot \rho_j(\theta_j) \cdot \partial \theta_j / \partial \tau + \text{div}(\lambda_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(\theta_j)) = k_I \sigma_j(\theta_j)^{-1} |\mathbf{J}_j(\theta_j)|^2 + \\ + \rho(\theta_j) \cdot \sum_{k=1}^n r_k(\theta_j) \cdot \partial u_{k,j} / \partial \tau, j = 1, 2, 3, \\ c_j(\theta_j) \cdot \rho_j(\theta_j) \cdot \partial \theta_j / \partial \tau + \text{div}(\lambda_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(\theta_j)) = 0, j = 4, 5, \\ c_j(\theta_j) \cdot \rho_j(\theta_j) \cdot \partial \theta_j / \partial \tau + \text{div}(\lambda_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(\theta_j)) = k_I \sigma_j(\theta_j)^{-1} |\mathbf{J}_j(\theta_j)|^2, j = 6, 7, \end{cases} \quad (5)$$

где $c_{\text{экв}j}(\theta_j) = c_j(\theta_j) + \sum_{k=1}^n (r_k(\theta_j) \cdot \partial u_{k,j} / \partial \tau)$ – эффективные удельные теплоемкости компонентов керна; $c_j(\theta_j), \rho_j(\theta_j), \lambda_j(\theta_j)$ – удельные теплоемкости, плотности и коэффициенты теплопроводности;

$r_k(\theta_j)$ – удельная теплота фазового перехода влаги, химических реакций для графитируемых компонентов заготовок электродов, пересыпки и шихты керна;

$u_{k,j}$ – влагосодержание или концентрации.

Плотности токов определяются соотношениями:

$$\mathbf{J}_j(\theta_j) = -\sigma_j(\theta_j) \cdot \mathbf{grad}(V_j), k_I = 1, j = 1, 2, 3, 6, 7$$

– при графитации постоянным током,

$$\mathbf{J}_j(\theta_j) = -\sigma_j(\theta_j) \cdot (\mathbf{grad}(V_j) + j\omega \mathbf{A}_j), k_I = 0, 5, j = 1, 2, 3, 6, 7$$

– при графитации переменным током.

Механизмы теплообмена при свободной конвекции охлаждающего воздуха и линейной температурной зависимости его плотности описываются системой уравнений [8]

$$\begin{cases} (\mathbf{W}_j \cdot \nabla) \mathbf{W}_j = -\rho(\theta_j)_j^{-1} \nabla p_j + \nu(\theta_j)_j \Delta \mathbf{W}_j - \beta_j(\theta_j - \theta_0) \mathbf{g}, \\ \rho(\theta_j)_j C_p(\theta_j)_j (\mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla \theta_j) - \nabla (\lambda(\theta_j)_j \nabla \theta_j) = 0_j, \text{div} \mathbf{v}_j = 0, j = 8, \end{cases} \quad (6)$$

где \mathbf{W} – скорость охлаждающего воздуха; $\rho(\theta)$, p , $C_p(\theta)$, $\nu(\theta)$,

β – плотность, давление, удельная теплоемкость, кинематическая вязкость и коэффициент объемного расширения воздуха;

\mathbf{g} – ускорение свободного падения.

Внутри расчетной области (рис. 1,б) условия сопряжения магнитных, электрических и температурных полей на границах раздела сред с различными электрофизическими и теплофизическими свойствами формулируются в виде:

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{i,k} \times (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_k) = 0|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\mathbf{J}_i - \mathbf{J}_k) = 0|_{\forall i,k \in (1,4), i \neq k}, \\ \mathbf{n}_{i,k} \cdot (\lambda(\theta_i)_i \nabla \theta_i - \lambda(\theta_k)_k \nabla \theta_k) = 0, \theta_i - \theta_k = 0|_{\forall i,k \in (1,3), i \neq k}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\mathbf{H} = (\mu_0 \mu)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}$ – напряженность магнитного поля.

Задаются однородные граничные условия на внешних боковых поверхностях расчетной области

$$\left\{ A_j = 0 \Big|_{\forall j \in (1,4)}, \mathbf{n}_j \cdot \mathbf{J}_j = 0 \Big|_{j=4}, \Delta \theta = \theta_j - \theta_0 = 0 \Big|_{j=1,4}, \right. \quad (8)$$

формулируются граничные условия на торцах керна ПГ

$$\left\{ A_j = \bar{k} \cdot A_y(x, z) \Big|_{j=4}, V_j = \Phi_j \Big|_{\forall j \in (1,3)}, \theta_j = \theta_{\text{гп}} \Big|_{j=1,4}, \right. \quad (9)$$

и на плоскости симметрии

$$\left\{ \mathbf{n}_i \times \mathbf{H}_i = 0 \Big|_{i=1,4}, \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{J}_i = 0 \Big|_{i=1,4}, \mathbf{n}_i \cdot (\lambda(\theta_i)_i \nabla \theta_i) = 0, \theta_{i+} - \theta_{i-} = 0 \Big|_{i=1,4}. \right. \quad (10)$$

При описании процессов теплообмена в шинах БШП с окружающей средой с учетом свободной конвекции и радиационной теплоотдачи может применяться эмпирическое соотношение [3], которое преобразуется в граничное условие

$$\mathbf{n}_j \cdot (\lambda(\theta_j)_j \nabla \theta_j) = 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha_j \cdot (\theta_j - \theta_{oc}) + 5,7 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \varphi) \cdot \left[\left(\frac{\theta_j}{1000} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{oc}}{1000} \right)^4 \right], j = 1, 2, \quad (11)$$

где α_k – коэффициент, зависящий от высоты (длины) шин; φ – коэффициент лучистого экранирования шин.

Условие (11) позволяет реализовывать решение систем уравнений электромагнитного поля (1) – (4) инвариантно по отношению к системам уравнений теплопроводности (5) и тепломассообмена (6). При расчетах температурных полей учитываются требования ПУЭ по допустимым уровням нагрева вторичных токопроводов.

Трехмерная модель (1) – (3) с условием калибровки Кулона (4), условиями сопряжения (7) и граничными условиями (8) – (11) реализуется методом конечных элементов в структуре средств ComsolMultiphysics.

Плотность и размеры конечных элементов в расчетной области (рис. 1,б) варьируют для сокращения затрат времени и вычислительных ресурсов без снижения требуемого уровня точности расчетов. В шинах БШП плотность конечных элементов увеличивается, а по мере приближения к внешним границам расчетной области она снижается.

По данным моделирования определяются токи, протекающие через выделенную площадку $S(S_{yz}, S_{xz}, S_{xy})_j$, удельные потери в кернах ПГ и в шинах БШП, мощность графитации:

$$\left\{ \begin{aligned} I_S|_j &= \sqrt{|I_x|^2 + |I_y|^2 + |I_z|^2} \Big|_j, I_x|_j = \iint_{S_{yz}} \mathbf{J}_x dydz \Big|_j, I_y|_j = \iint_{S_{xz}} \mathbf{J}_y dx dz \Big|_j, I_z|_j = \iint_{S_{xy}} \mathbf{J}_z dx dy \Big|_j, \\ p|_j &= \sigma_j^{-1} |\mathbf{J}_j|^2, P|_j = \iiint_{V_j} p|_j dx dy dz. \end{aligned} \right. \quad (12)$$

Итерационный вычислительный процесс отвечает принятым критериям точности для результирующих токов в шинах БШП и кернах ПГ. Причем для графитации постоянным током сравниваются силы токов графитации и суммарных токов в БШП, а для переменного тока такое сравнение выполняется как по модулю амплитуд $\varepsilon_{I_{\text{тшп}}} \leq [\varepsilon_{I_{\text{тп}}}]$, так и фазовому углу $\varepsilon_{\text{тшп}} \leq [\varepsilon_{\text{тп}}]$ этих токов. Для суммарного тока БШП и тока графитации относительная невязка не превышает для модулей амплитуд 0,24 %, для фаз этих токов – 0,07 %.

Средняя температура керна ПГ рассчитывается с помощью интегрального соотношения

$$\theta_{\text{кern}} = \frac{1}{V_j} \iiint \theta|_j dx dy dz. \quad (13)$$

Исследования проводятся путем реализации математической модели (1) – (11) в структуре средств ComsolMultiphysics с использованием интегральных соотношений (12) для интервала изменения средней температуры керна (13) от $\theta_{\text{кern}} = 20^\circ\text{C}$ до $\theta_{\text{кern}} = 3000^\circ\text{C}$ во время кампании графитации.

Точность результатов численного моделирования оценивается путем сравнения расчетных значений мощности графитации, токов и падений напряжения в кернах и БШП с экспериментальными данными регистрации электрических режимов для различных кампаний графитации переменным током (класс точности регистратора – 0,2 [9]). Относительные погрешности расчетов падений напряжений и мощности графитации не превышают 0,9% и 1,03%, относительная токовая погрешность составляет 1,12%.

По данным расчетов исследуется распределение относительных значений плотности тока (модуля плотности тока) при переменном (AC) и постоянном токе графитации (DC)

$$\tilde{J}_{AC} = \frac{|J_{AC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))|}{\max[J_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))]}_{\forall (x, y, z) \in S_g}, \quad \tilde{J}_{DC} = \frac{J_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))}{\max[J_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))]}_{\forall (x, y, z) \in S_g}. \quad (14)$$

Для визуализации полевых расчетов рассматриваются распределения плотностей токов в вертикальных плоскостях поперечного сечения, проходящего через оси заготовок основной зоны керна, при средних температурах графитации, равных $\theta_{\text{кern}} = 500^\circ\text{C}$ и $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ (рис. 2). Светлые поверхности относительных плотностей тока и серые линии их равного уровня соответствуют переменному току, более темные поверхности относительных плотностей тока и черные линии равного уровня – постоянному току (рис. 2).

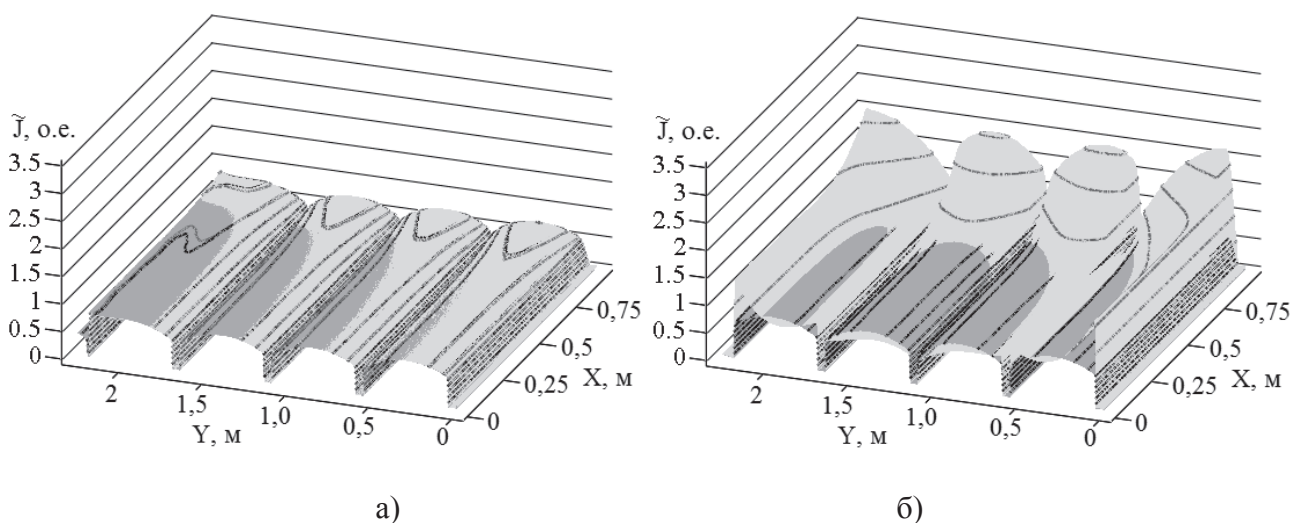


Рис. 2. Распределение относительной плотности тока в поперечном сечении керна при температурах $\theta_{\text{кern}} = 500^\circ\text{C}$ (а) и $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ (б)

При средней температуре керна, равной $\theta_{\text{кern}} = 500^\circ\text{C}$ (рис. 2 а) эти поверхности достаточно близки друг к другу. В пересыпке между горизонтальными рядами заготовок относительные плотности токов существенно ниже, чем в самих заготовках электродов из-за шунтирующего эффекта этих заготовок. Максимальное значение плотности переменного тока (14) превышает аналогичное значение для постоянного тока только на 1,29 %. Отношение среднего значения плотности тока к ее максимальному значению составляет 60,7 % для постоянного тока и 60,3 % – для переменного тока. Это обусловлено сравнительно высокими удельными сопротивлениями заготовок электродов, материалов пересыпки и шунтирующих слоев керна, что ограничивает влияние поверхностного эффекта от переменного тока керна и внешнего поверхностного эффекта от токов в БШП.

С ростом средней температуры керна до $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ из-за снижения удельных сопротивлений его материалов и, прежде всего, заготовок электродов влияние поверхностного и внешнего поверхностного эффектов существенно усиливается (рис. 2 б). Поэтому поверхность относительной плотности переменного тока имеет явно выраженные вершины возле торцов электродов с максимумами значений возле границ шунтирующей шихты керна. Распределение относительной плотности постоянного тока вдоль заготовок электродов будет более равномерным.

При температуре $\theta_{\text{кern}} = 3000^\circ\text{C}$ отношение среднего значения плотности тока к ее максимальному значению остается примерно на том же уровне и составляет 66 % для постоянного тока, а для переменного тока снижается до 28,2 %.

Максимальное значение плотности переменного тока в заготовках становится больше соответствующего значения плотности постоянного тока на 160 % при температуре $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ и на 246 % при температуре 3000°C .

Исследуется изменение кратности плотности тока, которая рассчитывается как отношение максимального значения плотности тока к ее среднему значению (рис. 3).

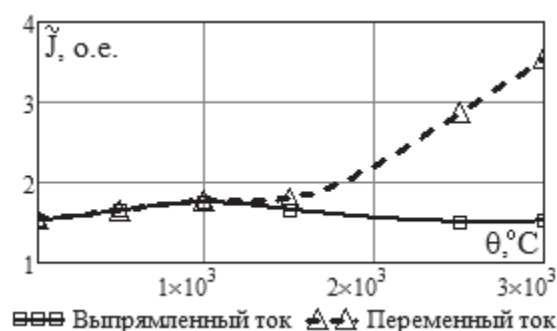


Рис. 3. Кратность плотности тока в поперечном сечении керна

При изменении средней температуры керна от $\theta_{\text{кern}} = 20^\circ\text{C}$ до $\theta_{\text{кern}} = 1000^\circ\text{C}$ кривые кратности плотности тока для постоянного и переменного тока достаточно близки друг к другу. Причем на этом интервале температур для постоянного тока кратность его плотности монотонно возрастает и при средней температуре $\theta_{\text{кern}} = 1000^\circ\text{C}$ достигает максимума равного 1,745, а затем монотонно убывает до значения 1,508 при средней температуре керна $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$, оставаясь практически постоянной при температурах $2500^\circ\text{C} < \theta_{\text{кern}} < 3000^\circ\text{C}$.

Кратность плотности переменного тока в поперечном сечении керна монотонно увеличивается от 1,54 при температуре $\theta_{\text{кern}} = 20^\circ\text{C}$ до 3,55 при температуре $\theta_{\text{кern}} = 3000^\circ\text{C}$. Отмечается область стабилизации значений этого параметра, которая соответствует диапазону температур $1000^\circ\text{C} < \theta_{\text{кern}} < 2500^\circ\text{C}$.

По данным полевых расчетов с помощью соотношений

$$q_{AC} = \frac{|p_{AC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))|}{\max[p_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))]}_{\forall (x, y, z) \in S_g}, q_{DC} = \frac{p_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))}{\max[p_{DC}(x, y, z, \theta_{\text{кern}}(\tau))]}_{\forall (x, y, z) \in S_g}. \quad (15)$$

выполняется нормирование удельных потерь в керне относительно их максимального значения в указанных выше сечениях керна для графитации постоянным током.

Для визуализации полевых расчетов рассматриваются распределения нормированных удельных потерь (рис. 4) в вертикальных плоскостях поперечного сечения, проходящего через оси заготовок основной зоны керна, при средних температурах графитации, равных $\theta_{\text{кern}} = 500^\circ\text{C}$ и $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$. Светлые поверхности нормированных удельных потерь и серые линии их равного уровня соответствуют переменному току, более темные поверхности относительных плотностей тока и черные линии равного уровня – постоянному току (рис. 4).

При средней температуре керна, равной $\theta_{\text{кern}} = 500^\circ\text{C}$ эти поверхности практически совпадают и контуры линии равного уровня для постоянного и переменного токов повторяют друг друга (рис. 4 а). Поверхностный эффект и внешний поверхностный эффект

при графитации переменным током при температурах керн $\theta_{\text{кern}} \leq 1000^\circ\text{C}$ практически не оказывают влияния на удельные потери. Поэтому добавочные потери в рассматриваемом сечении керн не превышают 1,4 %.

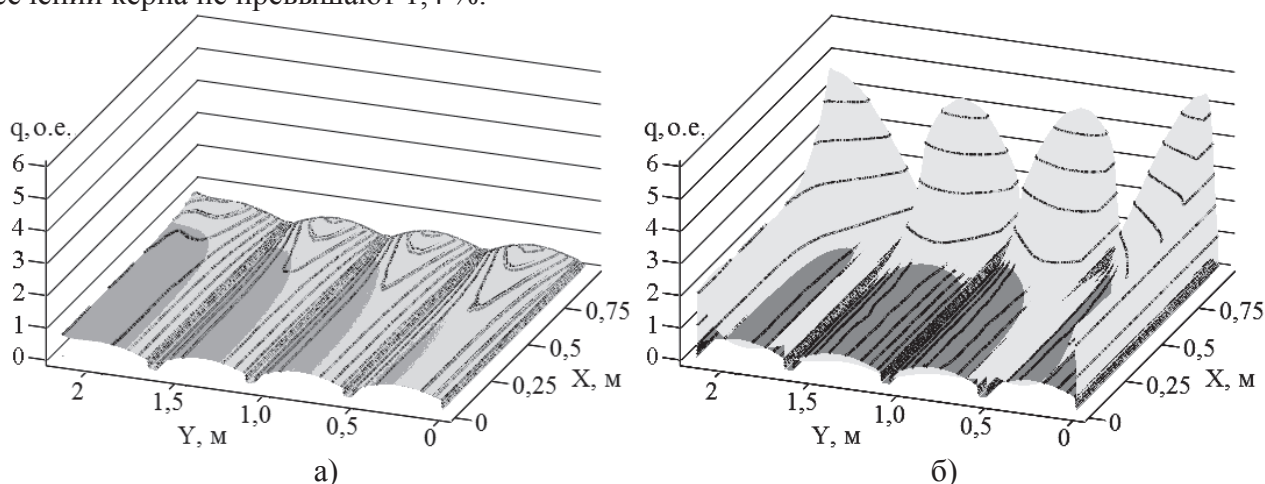


Рис. 4. Распределение нормированных значений удельных потерь в поперечном сечении керн при температурах $\theta_{\text{кern}} = 500^\circ\text{C}$ (а) и $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ (б)

По мере роста средней температуры керн наблюдается существенный рост добавочных потерь, прежде всего, на участках, имеющих протяженность до 25% длины заготовок электродов и прилегающих к их торцам (рис. 4 б). При средней температуре керн $\theta_{\text{кern}} = 2500^\circ\text{C}$ максимальные значения нормированных удельных потерь (15) составляют 4,1...4,24 для торцов внутренних заготовок и 4,98...5,25 – для торцов наружных заготовок внутренней зоны керн. Для торцевых зон керн эти значения увеличиваются на 6,2...7,3% относительно его внутренней зоны. При средней температуре керн $\theta_{\text{кern}} = 3000^\circ\text{C}$ добавочные потери достигают 144 % в сечениях по осям электродов и не превышают 1,5 % в пересыпке.

При графитации переменным током для средних температур керн выше 2000°C отмечается рост локальной удельной мощности тепловыделения в торцевых областях заготовок до 2,5 раз и увеличения тепловой мощности в боковых шунтирующих слоях керн до 42 %.

На протяжении кампании графитации в торцевых зонах керн плотности тока в заготовках электродов на 1,2...3,4% выше, чем во внутренней зоне керн, а удельные потери больше на 1,5...7,8 %.

Температурные поля в заготовках электродов при графитации переменным и постоянным током при изменении средних температур керн от 20°C до 1000°C практически идентичны. Наибольшие различия в температурных полях заготовок отмечаются в интервале средних температур керн от 2000°C до 3000°C . Добавочные потери, обусловленные поверхностными эффектами в керне и внешними поверхностными эффектами от токов в шинах БШП, способствуют выравниванию температур в объеме заготовок электродов и снижению перепадов температур на 7...11 % по сравнению с графитацией постоянным током. В интервале средних температур керн от 1000°C до 2000°C эти факторы также имеют место, но они менее выражены.

Существенное снижение перепадов температур в заготовках электродов достигается при повторно-кратковременном режиме ввода мощности, особенно при графитации переменным током. Таким образом, графитация переменным током позволяет повысить темп ввода мощности во время кампании по сравнению с графитацией постоянным током, но требует дополнительных затрат электроэнергии на компенсацию реактивной мощности (установленная мощность трансформаторов устройства поперечной компенсации достигает 18...20 МВ·А).

Поэтому, целесообразно применять специальный способ ввода мощности графитации: на первом этапе разогрева при температурах зерна до 1000 °С – на постоянном токе, на втором этапе разогрева в интервале средних температур зерна от 2000 °С до 3000 °С – на переменном токе, на завершающей фазе кампании – на постоянном токе. Это позволит на 70...75 % уменьшить расход электроэнергии на компенсацию реактивной мощности во время кампании графитации и на 4,2...4,5 % снизить расход электроэнергии на тонну готовой продукции.

Выводы

Предложены сопряженные пространственные модели, отображающие особенности электромагнитных, электротепловых и тепломассообменных процессов в печной петле и печи графитации, учитывающие особенности конструкции печи графитации, ее зерна, боковых шинных пакетов печной петли и температурные зависимости электрофизических и теплофизических свойств материалов печи, зерна, заготовок электродов, шинных пакетов и охлаждающей среды.

Разработана методика численной реализации 3D модели сопряженных электромагнитных, электротепловых и тепломассообменных процессов в структуре средств ComsolMultiphysics с использованием варьирования плотности распределения конечных элементов в пространстве расчетной области, которое обеспечивает вычислительную эффективность и требуемую точность моделирования. Для суммарного тока БШП и тока графитации относительная невязка составляет для модулей их амплитуд 0,24%, для фаз этих токов – 0,07 %. Относительные погрешности расчетов падений напряжений на БШП и мощности графитации не превышают 0,9 % и 1,03 % при сравнении с данными регистрации электрических режимов во время различных кампаний графитации переменного тока.

Установлено, что на этапе разогрева переменным током локальная удельная мощность тепловыделения в торцевых областях заготовок при средних температурах зерна от 2000°С до 3000°С увеличивается до 2,5 раз по сравнению с постоянным током, обуславливая снижение перепадов температур на 7...11 % и повышение качества готовой продукции.

Предложен способ трехэтапного ввода мощности, с чередованием питания от источников постоянного и переменного тока, который сохраняет преимущества нагрева на переменном токе и позволяет снизить затраты электроэнергии на компенсацию реактивной мощности на 70...75 % и на 4,2...4,5 % уменьшить расход электроэнергии на тонну готовой продукции

Список литературы

1. Кузнецов Д. М. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования [Текст] / Д. М. Кузнецов, В. П. Фокин. – Новочеркасск: ЮРГТУ. – 2001. – 132 с.
2. Кузнецов Д. М. Графитация крупногабаритных электродов. Процесс Ачесона [Текст] / Д. М. Кузнецов. – Ростов н/Д: РГАСХМ ГОУ. – 2003. – 168 с.
3. Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. [Текст] / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 550 с.
4. Дрешпак Н. С. Результаты анализа режимов индукционного нагрева разъемных деталей машин [Текст] / Н. С. Дрешпак // Научный вестник НГУ – Днепропетровск. – 2012. – № 4. – С. 108 – 113.
5. Ярымбаш Д. С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // Электротехника та електроенергетика. – 2010. № 2. – С. 36 – 43.
6. Коржик М. В. Дослідження бічного шунта печі графітації [Текст] / М. В. Коржик, Г. І. Гурчик // Восточно-европейский журнал передовых технологий – Харьков: Технологический центр, 2012. – № 3/5 (57). – С. 39 – 43.
7. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб.пособие для студентов высш. учеб. заведений [Текст] / О. Б. Буль. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.
8. Ярымбаш Д. С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации [Текст] / Д. С. Ярымбаш // «Электротехника и электромеханика». – 2012. – № 1. – С. 49 – 54.
9. Ярымбаш Д. С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, О. В. Тютюнник // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2006, – Вип. 3/2006(38), – С. 53–55.

10. Ярымбаш Д. С. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мунштука пресса / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету – Кременчук, КДПУ, 2007. – №4(45) Частина 1. – С. 53–55.

References:

1. Kuznecov, D. M. and Fokin, V.P. (2001) "The process of graphitization of carbon materials. Modern methods of investigation" [Protsey graphitatsii uglerodnykh materialov. Sovremennyye issledovaniya], JuRG TU, Novocherkassk, 132 p.
2. Kuznecov, D. M. (2003) "Graphitization of the large electrodes. Acheson process" [Gravitatsia krupnogabaritnykh elektrodov. Protsey Achesona [Tekst]], RGASHM GOU, Rostov n/D, 168 p.
3. Cvetkov, F. F. and Grigor'ev, B. A. (2006) "Heat and Mass Transfer" [Teplomassoobmen: Uchebnoe posobie dlya vuzov/–2-e izd., ispr. i dop. [Tekst] F. F. Cvetkov, B. A. Grigor'ev], Moscow, Izdatelstvo M'EI, 550 p.
4. Dreshpak, N. S. (2012), "Results of analysis of induction of heating modes of machine parts with detachable connection, *Scientific bulletin of National mining university* [Rezultaty analiza rezhimov indukzionnogo nagreva raze'mnykh detal'ey mashin [Tekst]/ N. S. Dreshpak// Nauchny vesnik NGU], no.4, P. 108–113.
5. Yarymbash, D. S., Kilimnik, I. M. and Yarymbash, S. T. (2010), "The features of determining the electrical equivalent circuit furnace hinges parameters of the AC graphitization furnace" [Osobennosti opredeleniya parametrov elektricheskoy shemy zameshcheniya pechnoy petli pechi grafitizatsii peremennogo toka [Tekst] //D. S. Yarymbash, I. M. Kilimnik i S. T. Yarymbash], *Elektrotehnika ta elektroenergetika, Zaporizhzhya*, P. 36–43.
6. Korzhyk, M. V. and Gurchyk, A. I. (2012), "Investigation of side shunt of graphitization kiln" [Doslidzhennia bichnogo shunta pechi grafitatsii [Tekst] / M. V. Korzhyk, A. I. Gurchyk], *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, Tehnologicheskij centr, Kharkov, no.3/5 (57), P. 39–43.
7. Bul', O.P. (2005), "Methods of calculation magnetic systems of electric devices: Magnetic circuits, fields and program FEMM: Textbooks for students in higher education" [Metody rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov: Magnitnye tsepi, polia i programmy FEMM: Uchebnoe posobie dlya studentov vysshikh ucheb. zavedeniy [Tekst] / O. P. Bul'], Izdatel'skij tsentr "Akademiya", Moscow, 336 p.
8. Yarymbash, D. S., Yarymbash, S. T. and Tyutyunnik, O. V. (2006), "The features of the control of electrical parameters, power and energy consumption during the campaign graphitization furnaces AC" [Identifikatsia elkticheskih parametrov pechnoy petli moshchnykh pechey grafitatsii [Tekst] / D. S. Yarymbash] //, *Visnyk Kremenchuckogo derzhavnogo politehnichnogo universytetu*, KDPU, Kremenschuk, no. 3(38), P. 53–55.
9. Yarymbash, D. S. (2012), "The identification of the circuit furnace electrical parameters of the power graphitization furnaces" [Osobennosti kontrolya elektricheskikh parametrov, moshchnosti i energopotrebleniya vo vremia kampanii grafitatsii v pechi peremennogo toka [Tekst] / D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, O. V. Yutyunnik] // *Visnyk Kremenchuckogo derzhavnogo politehnichnogo universytetu*, *Jelektrotehnika i jelektromehanika*, Kharkov, no.1, P. 49–54.
10. Yarymbash, D. S. and Kilimnik, I. M. (2007), "The features simulation of electromagnetic processes in the inductor calibers of mouthpiece press" [Osobennosti modelirovaniya elektromagnitnykh protsesov v induktore kalibra mundштука пресса / D. S. Yarymbash, I. M. Kilimnik] // *Visnyk Kremenchuckogo derzhavnogo politehnichnogo universytetu*, KDPU, Kremenschuk, no. 4(45), P. 53–55.

Поступила в редакцию 06.06.2014 г.